



BE0000007

BLG--773

Beheer van radioactief afval

Actuele vragen rond kernenergie
Questions actuelles sur l'énergie nucléaire



3.1 / 39

Am

Laboratories:

Boeretang 200

B-2400 Mol

Tel.: (+32-14) 33 21 11

Fax: (+32-14) 31 50 21

Registered Office:

Herrmann Debrouxlaan 40-42

B-1160 Brussels

Tel.: (+32-2) 661 19 51

Fax: (+32-2) 661 19 58

Contact (Mol):

Anne Verledens

Public Relations

Tel.: (+32-14) 33 25 86

Fax: (+32-14) 33 25 84

e-mail: averlede@sckcen.be

Beheer van radioactief afval

Bernard Neerdael
Jan Marivoet
Martin Put
Pierre Van Iseghem
Geert Volckaert
William Wacquier

Waste and Disposal Research Unit





Inleiding

De wereldwijde discussies over het energiebeleid en zijn impact op het leefmilieu doen meer dan ooit een beroep op de verbeelding van de onderzoekers actief op dit gebied. Kernenergie kan een belangrijke rol spelen in de tegemoetkoming aan een (steeds grotere) vraag naar energie, op voorwaarde dat de bevolking en de investeerders overtuigd kunnen worden dat kernenergie veilig en economisch aantrekkelijk is en geen verborgen risico's met zich meebrengt. Het SCK•CEN ziet het als een plicht ten opzichte van de toekomstige generaties om een bijdrage te leveren aan het algemene energiedebat, zodat beslissingen hieromtrent niet emotioneel maar wetenschappelijk objectief kunnen genomen worden.

Dit rapport maakt deel uit van een reeks documenten dat de actuele vragen rond kernenergie vanuit een wetenschappelijk perspectief - doch met een kritische geest - benadert. Een lijst van de bestaande rapporten is weergegeven op de volgende bladzijde. De documenten werden opgesteld als antwoord op steeds terugkomende vragen omtrent kernenergie en behandelen zodoende de onderwerpen die vandaag van belang zijn bij de beslissingen in verband met de toepassing van de kernenergie en het onderzoek terzake:

- een visie over de toekomst van de kernenergie in het algemeen, met een bespreking van economische, sociale en politieke factoren en milieuaspecten die deze toekomst kunnen beïnvloeden;
- de rol van de huidige nucleaire reactoren en hun verdere betrokkenheid in de energievoorziening;
- de ontwikkelingen die plaats grijpen in de beheersing van de brandstofcyclus;
- een uitgebreid technologisch en economisch assessment over hybride systemen, o.a. de door Rubbia aangegeven nieuwe nucleaire productiewijze van energie;
- andere nieuwe nucleaire ontwikkelingen omtrent splitsingsenergie;
- de vooruitgang van de fusie-energie.

Referenties**Rapporten "Actuele vragen rond kernenergie - Questions actuelles sur l'énergie nucléaire"**

- SCK•CEN / BLG-771 Perspectives pour l'énergie nucléaire
Jean-Marie Baugnet
- SCK•CEN / BLG-772 Review of possible nuclear fuel cycles in Belgium
Charles De Raedt
- SCK•CEN / BLG-773 Beheer van radioactief afval
Pierre Van Iseghem
- SCK•CEN / BLG-774 Le combustible utilisé et le plutonium en tant que déchets nucléaires - gestion à long terme
Guy Collard
- SCK•CEN / BLG-775 Radiologische impact van de splijtstofcycli
Mark Loos
- SCK•CEN / BLG-776 Nieuwe reactorconcepten
Gaston Meskens
- SCK•CEN / BLG-777 Perspectieven voor de fusie-technologie
Frans Moons
- SCK•CEN / BLG-778 Snelle reactoren
Jean Dekeyser
- SCK•CEN / BLG-779 Hybride systemen
Luc Van Den Durpel
- SCK•CEN / BLG-780 Déclassement et restauration des sites nucléaires
Luc Noynaert
- SCK•CEN / BLG-781 Proliferatierisico's
Roland Carchon
- SCK•CEN / BLG-782 Plan Life Management
José Van de Velde



Inhoud

		Samenvatting
4	1	Beheer van de radioactieve afval
	1.1	Bepalingen en algemeenheden
	1.2	Specificiteiten verbonden aan dit type afval
8	2	Radioactief afval en conditionering
	2.1	Inventaris van het radioactief afval in België
	2.2	Behandeling en conditionering van het radioactief afval
	2.3	Trends in conditionering van radioactief afval
	2.4	Karakterisering van het geconditioneerd afval
	2.5	Verenigbaarheid van geconditioneerd afval met geologische berging
15	3	Berging van radioactief afval
	3.1	Fundamentele principes en rol van de barrières
	3.2	Mogelijkheden voor de verschillende afvaltypes
18	4	Geologische berging van geconditioneerd hoog en middel radioactief afval
	4.1	Mogelijke gastformaties in België en weerhouden opties
	4.2	Concepten
	4.3	R&D-programma
	4.4	Performantiestudies
25	5	Algemene besluiten
28		Referenties



Résumé

Les déchets radioactifs sont produits principalement pendant toutes les étapes du cycle du combustible, chacune d'elles posant ses propres problèmes de transport, conditionnement, stockage et évacuation. A ces déchets s'ajoutent ceux produits par les applications en médecine, en agriculture et dans l'industrie.

La gestion des déchets radioactifs a pour but de protéger l'homme et son environnement des nuisances potentielles de tels déchets. On distingue généralement les déchets de basse activité des déchets dits de moyenne à haute activité; l'origine et l'inventaire de ces déchets pour notre pays sont repris brièvement dans ce document. L'accent y sera mis sur les déchets consécutifs à la production d'énergie électrique et plus particulièrement sur les déchets à haute activité et à longue demi-vie.

Plus que les opérations de transport ou de stockage, le conditionnement et l'évacuation nécessitent un programme de recherche et développement important, prenant en compte des spécificités telles que l'échelle de temps considérée ou encore la crédibilité requise vis à vis de l'opinion publique. Compte tenu de la complexité des processus mis en jeu, cette démarche scientifique s'articule le plus souvent dans un cadre international, favorisant la comparaison des approches et la validation des outils utilisés. Ceci concerne notamment les différentes techniques de conditionnement et leur évolution ou encore l'interaction de ces matrices de déchets et de leur emballage avec l'environnement.

Les investigations sur le retraitement "poussé" en cours à l'étranger ne remettent pas en question les études relatives à l'évacuation géologique, ne serait-ce que pour le combustible à oxyde mixte (MOX) dont le nombre de recyclage est limité. Vu l'importance stratégique de tels sujets, la gestion du combustible usé, y compris les aspects relatifs au stockage temporaire ou à l'évacuation en formation géologique, fait l'objet d'un autre rapport.

La caractérisation d'un site d'évacuation (géosphère), qu'il soit expérimental ou définitif, représente tout comme la caractérisation des déchets, un domaine de recherche essentiel. Mais le principe "multibarrières" sur lequel tout système d'évacuation finale de déchets repose, suppose encore la démonstration des performances à moyen terme des barrières "ouvrées" à mettre en place entre la matrice de déchets et la roche hôte.

Une fois le terme source identifié, le concept défini et l'environnement géologique caractérisé, les performances du système global peuvent être évaluées à long terme sur base de scénarios de référence et d'hypothèses de travail conservatrices. Ces études sont réalisées dans le cadre des rapports préliminaires d'évaluation de faisabilité et de sécurité (SAFIR). Pour les déchets de basse activité, il est fait référence aux alternatives possibles en matière d'évacuation en surface, à faible profondeur ou géologique.

En conclusion, le document souligne l'impact de la gestion des déchets dans le débat sur l'énergie et la validité dans le contexte international des solutions à l'étude dans notre pays. Il définit encore dans ce contexte les domaines prioritaires de R&D à poursuivre à court et moyen terme.



Samenvatting

Radioactieve afvalstoffen worden voornamelijk geproduceerd tijdens de diverse etappes van de splijstofcyclus, waarbij elke etappe specifieke problemen stelt op het vlak van transport, conditionering, opslag en berging. Hiernaast produceren toepassingen in de geneeskunde, de landbouw en de industrie eveneens radioactieveafvalstoffen.

Het beheer van de radioactieve afvalstoffen heeft tot doel de mens en zijn omgeving te beschermen tegen de potentiële schadelijke gevolgen van dergelijke afvalstoffen. Doorgaans wordt een onderscheid gemaakt tussen de laag-actieve afvalstoffen en de middelmatig- en hoog-actieve afvalstoffen; de herkomst en de inventaris van deze afvalstoffen voor ons land worden in het kort vermeld in onderhavig document. De klemtoon wordt hierbij gelegd op de afvalstoffen die resulteren uit de elektriciteitsproductie en meer bepaald op deze met hoge activiteit en lange halveringstijd.

Meer nog dan de transport- en opslagoperaties, vereisen conditionering en berging een omvangrijk onderzoeks- en ontwikkelingsprogramma, waarbij rekening gehouden wordt met specifieke aspecten zoals de beschouwde tijdschaal of de geloofwaardigheid die vereist is ten overstaan van de publieke opinie. Rekening houdend met de complexiteit van de aangewende procédés, wordt deze wetenschappelijke ontwikkeling meestal uitgevoerd in een internationaal kader, wat vergelijking van de benaderingen en validaties van de gebruikte middelen bevordert. Dit betreft onder meer de ontwikkeling van de verschillende conditioneringstechnieken of de interactie van de afvalmatrices en hun verpakking met de bergingsomgeving.

De onderzoeken naar een "doorgedreven" opwerking, die in het buitenland worden uitgevoerd, stellen de geologische berging niet opnieuw in vraag, tenzij misschien voor de mengoxide splijstof (MOX) waarvan het aantal bestralingscyclussen beperkt is. Gelet op het strategisch belang van dergelijke onderwerpen is het beheer van opgebrande splijstof, met inbegrip van de aspecten die betrekking hebben op tussentijdse opslag of berging in ondergrondse formaties, het onderwerp van een ander verslag.

De karakterisering van een bergingssite (geosfeer), onafgezien deze experimenteel of definitief is, vormt, net als de karakterisering van geconditioneerde afvalstoffen, een essentieel onderzoeksgebied. Maar het "multi-barrière" principe waarop elk systeem voor definitieve berging steunt, veronderstelt eveneens de demonstratie van de goede werking op middellange termijn van de kunstmatige barrières die dienen aangebracht tussen de afvalmatrix en de gastformatie.

Zodra de bronterm geïdentificeerd is, het concept bepaald en de geologische omgeving gekarakteriseerd, kan de performantie van het globaal bergingssysteem op lange termijn geëvalueerd worden op basis van referentiescenario's en conservatieve werkhypothesen. Deze studies worden onder meer uitgevoerd in het raam van preliminaire rapporten over de evaluatie van de uitvoerbaarheid en veiligheid (SAFIR). Voor de laag-actieve afvalstoffen wordt verwezen naar mogelijke alternatieve bergingstechnieken: aan de oppervlakte, op lage diepte of in de ondergrond.

Tot besluit kan gesteld worden dat onderhavig document de impact van het beheer van de afvalstoffen op het energiedebat onderlijnt, alsook de geldigheid in internationaal verband van de oplossingen die in ons land worden bestudeerd. In deze context bepaalt het eveneens de prioritaire O&O -gebieden die op korte en middellange termijn verder dienen onderzocht.

1

Beheer van radioactief afval

1.1 Bepalingen en algemeenheden

De definitie van radioactief afval voorgesteld door het Agentschap voor Atoomenergie van de OESO luidt: "elk materiaal dat radionucliden bevat in een concentratie die hoger is dan de waarden die door de bevoegde overheid als toelaatbaar worden beschouwd in de materialen die eigen zijn aan een aanwending zonder controle en waarvoor geen enkel gebruik is voorzien".

Het radioactief afval dat in België wordt geproduceerd resulteert voornamelijk uit de opwekking van elektriciteit via kernenergie met inbegrip van de acties die verband houden met de fabricage van de splijtstof, de opwerking ervan, de conditionering van het afval en de ontmanteling van de installaties; een kleinere hoeveelheid is afkomstig van de activiteiten van de onderzoekscentra, de hospitalen of de industrie.

In België Onderscheidt men, naargelang hun activiteit, drie categorieën afval: afval met hoge (type C), middelmatige (type B) en lage (type A) activiteit. Het is niettemin ook nodig te verwijzen naar de halveringstijd van de samenstellende radioactieve elementen, die een aanduiding geeft van de tijdsduur waarin ze tot de helft van hun initiële waarde zijn vervallen. Zo behoort het laagactief afval dat elementen met lange halveringstijd bevat tot het type B; het middelactief afval dat uitsluitend elementen bevat met een halveringstijd van minder dan 30 jaar, behoort tot het type A.

De Nationale Instelling voor het beheer van de Radioactieve Afvalstoffen en de Splijtbare Materialen, NIRAS, is verantwoordelijk voor het geheel van de operaties waaraan het afval is onderworpen, vanaf zijn produktie tot zijn berging. Volgens het principe "de vervuiler betaalt" worden de kosten verbonden aan het beheer van dit afval en aan de vereiste operaties tot en met hun berging, gedragen door de Belgische afvalproducenten. Een fonds beheerd door de staat en de afvalproducenten zal de financiering op lange termijn van deze activiteiten verzekeren.

Naast de operaties die betrekking hebben op het transport en de opslag van afval, die thans goed gekend zijn, wordt het beheer van nucleair afval nog meer toegespitst op de oplossing van de problemen in verband met hun berging. Onrechtstreeks gaat de aandacht ook naar specifieke problemen van conditionering die zich stellen ofwel voor "exotische" elementen, ofwel voor de verbetering van de verenigbaarheid van de matrix met de omgeving van de bergingssite. Anderzijds zo men redelijkerwijs aanneemt dat de conditioneringstechnieken efficiënt zijn over enkele eeuwen, kan niet met stelligheid beweerd worden dat zij dit ook zullen zijn over meerdere duizenden jaren; vandaar het belang om de karakteristieken ervan te beheersen en de prestaties op lange termijn te evalueren.

De meeste landen overwegen de opslag in de ondergrond voor het hoogactief afval dat warmte afgeeft en/of met lange halveringstijd. Dit complex probleem dat moet worden opgelost en vooral moet worden aanvaard door de publieke opinie, gaat gepaard met omvangrijke wetenschappelijke en technische onderzoeksprogramma's op internationaal niveau. De diverse onderzoeksdomeinen die aan bod komen bij de studie van de berging in geologische lagen en de uitvoering ervan zullen behandeld worden in het raam van onderhavig document, in het bijzonder voor het Belgisch programma voor berging in kleilagen.

De tijdelijke/tussentijdse opslag van hoogactief afval met lange halveringstijd is noodzakelijk gedurende een vijftigtal jaar, tot op heden voornamelijk om thermische redenen; dit is vooral gerechtvaardigd ingeval van berging in kleilagen.

Gelet op de problemen die verband houden met de karakterisering en de selectie van potentiële sites, is het risico groot dat de tussentijdse opslag wordt beschouwd als een "voorlopig definitieve" tijdelijke oplossing. Sommige landen overwegen een lange-termijn opslag en ontwerpen perfect dichte cilinders die warmte-afvoer tussen het opgesloten afval en de atmosfeer toelaat. Zo bestudeert men bij voorbeeld "kastelen" van bijna 100 ton, die tot 28 containers met verglaasd afval bevatten, bestaande uit meerdere enveloppes van staal en hars om de stralingen en de neutronen van de bestraalde splijstof te absorberen.

Onder de voorgestelde oplossingen voor de berging van middel- en laagactief afval met korte halveringstijd, wordt de bovengrondse berging heden beschouwd als het meest realistisch alternatief, zoals in één van de hierna volgende hoofdstukken zal worden toegelicht.

Tenslotte vestigt het begrip afval, zoals hiervoor bepaald, de aandacht op de begrippen van schadelijkheid en niet-gebruik. Het bepalen van een schadelijkheidsgrens zal, in het geval van lage activiteiten, afhangen van de socio-economische context en perceptie van de risico's. Het begrip gebruik verwijst voornamelijk naar economische criteria, meer bepaald voor het plutonium. Nieuwe onderzoekspistes worden in het buitenland in overweging genomen maar deze zijn enkel denkbaar op zeer grote schaal: doorgedreven scheiding van de actiniden en transmutatie (in een snelle reactor, of in een deeltjesversneller), verbruik van het Pu (in een snelle reactor), gebruik van "calixarenen"¹ voor selectieve extrahering. Deze beloftevolle technieken werden nog niet industrieel aangetoond en het effect dat verwacht wordt voor sommige isotopen zal beperkt blijven. De berging in ondergrondse lagen van de gebruikte splijstof, waaronder mengoxydesplijstof (MOX), zal bijgevolg op termijn nodig blijven op Belgisch niveau.

Dergelijke vooruitzichten op het stuk van doorgedreven opwerking van de gebruikte splijstof en van zijn recycling hebben er toe geleid dat heden een aantal wetenschappers ijveren ten gunste van de rechtstreekse maar omkeerbare opslag van de gebruikte splijstof. Dit zou toelaten in de toekomst voordeel te halen uit de technologische ontwikkelingen op deze gebieden. Dient de gebruikte splijstof beschouwd te worden als afval of niet? Hier raakt men een gevoelige discussie over het beheer van de gebruikte splijstof die, gelet op haar belang, het voorwerp zal uitmaken van een afzonderlijk gedetailleerd verslag. Onderhavig document beperkt zich tot geconditioneerd afval.

1.2 Specificiteiten verbonden aan het type afval

In vergelijking met toxisch industrieel afval heeft radioactief afval het voordeel dat het hier gaat om veel kleinere hoeveelheden die gemakkelijker te identificeren en te voorzien zijn; bovendien neemt hun "toxiciteit" af met de tijd. Op korte en middellange termijn stelt het beheer dus geen onoverkomelijke problemen.

¹ "Calixarenen" zijn een groep van organische moleculen. Het zijn typisch conische-mandvormige moleculen-ketens. Hun typische structuur maakt hen bijzonder interessant voor de extractie van specifieke cationen en complexatiestudies van het type "gas-gastheer".

Bij nader onderzoek naar de oorzaak waarom dit radioactief afval aanvoeld wordt als een groot risico voor het milieu, kunnen vooral volgende drie redenen worden opgesomd:

- de gevolgen van vroegere toepassingen, vooral in militaire programma's die het milieu in sommige landen blijvend hebben besmet;
- de aanwezigheid van elementen met lange halveringstijd die een opsluiting ten opzichte van de biosfeer noodzaken voor een duur die deze van de menselijke samenleving overtreft;
- een wantrouwen van het publiek ten opzichte van de afvalbeheerders en -producenten, als gevolg van een gebrek aan informatie en communicatie.

De eerst aangehaalde reden overstijgt ruim de schaal van ons land; de andere redenen onderstrepen de essentiële rol die gespeeld wordt door de factor "tijd" en door de talloze facetten van het probleem die hier een noodzakelijk deel uitmaken van het werkkader.

Lange termijn

Diverse wegen worden gevolgd of worden momenteel bestudeerd op internationaal niveau met het oog op een vermindering van de potentiële hinder op lange termijn die door afval met lange halveringstijd wordt gesteld. Een tweede oogmerk is een verhoging van de betrouwbaarheid op lange termijn van de voorgestelde oplossingen voor berging, met name de heropwerking in de brede zin en de studie van natuurlijke analogen.

Heropwerking

De "klassieke" heropwerking behelst de terugwinning van uranium en plutonium die samen 96% van de massa van de verbruikte splijtstof vertegenwoordigen; de overige 4% worden geconditioneerd onder de vorm van glas. De glascollen zijn bestemd voor ondergrondse opslag. Deze techniek wordt algemeen toegepast in Frankrijk, Groot-Brittannië en Japan. De heropwerking leidde tot het gebruik van MOX(mengoxyde)-splijtstof hetgeen de mogelijkheid biedt een deel van het aldus teruggewonnen plutonium te recyclen. Omwille van de verrijking aan pare, niet-splijtbare isotopen is de plutoniumrecyclage echter beperkt.

De radiologische weerslag in vergelijking met rechtstreekse opslag van verbruikte splijtstof (Verenigde Staten, Zweden) manifesteert zich slechts na vele honderdduizenden jaren.

In de wet van 30 december 1991, legt Frankrijk onder meer nieuwe onderzoekslijnen vast voor de afvalstoffen met hoge activiteit en lange halveringstijd, zoals de aanwending van plutonium in snelle reactoren (CAPRA-project), de doorgedreven scheiding van de actiniden (SPIN-project) en meer algemeen de transmutatie /1/. Transmutatie is het verminderen van de stralingstoxiciteit door transformatie van de afvalstoffen met lange halveringstijd in kernen met lagere stralingstoxiciteit en korte halveringstijd of in stabiele kernen. Verschillende scenario's worden bestudeerd waaronder het gebruik van hybride systemen (versneller/reactor); de experimenteerperiode zal zeer lang zijn en de kosten aanzienlijk /2/.

Natuurlijke analogen

De karakterisering van potentiële sites met het oog op een ondergrondse opslag en het begrijpen van de complexe processen die verwacht worden op geologische tijdschalen, wat een vereiste is voor iedere betrouwbare veiligheidsstudie op lange termijn, kunnen voordeel halen uit de studie van natuurlijke analogen.

Het meest gekende voorbeeld, waarop 25 jaar geleden de aandacht werd gevestigd door CEA (F), is de ertsmin van Oklo in Gabon, waar een verarming van het uranium-235 met 1% werd vastgesteld in een lot ertsen. Deze anomalie is het resultaat van kernreacties die twee miljard jaar geleden spontaan in werking zijn getreden in de ertslaag waaruit dat lot afkomstig was. De analyse van de migratie van radioactieve elementen in de ondergrond van Oklo biedt de mogelijkheid op het terrein een groot aantal pertinente mechanismen te begrijpen die relevant zijn voor de veiligheidsanalyse; de studie heeft

een dubbel belang: het betreft een reële onderwerp voor studie en hydrodynamische modellisatie waarvan de fysische en chemische complexiteit van dezelfde orde is als deze van potentiële sites voor de berging van radioactief afval.

Nog andere sites worden bestudeerd; vermelden we bij voorbeeld Poços de Caldos (redoxfront, migratie van uranium en thorium) in Brazilië, de analogen van cement in Jordanië, enz.

Voor België is de Boomse klei, die 32 miljoen jaar oud is en uranium, thorium en zeldzame aarden bevat, het voorwerp van gedetailleerde mineralogische en geochemische studies om de migratieprocessen die hebben plaats gehad aan te tonen en op deze wijze de gebruikte geochemische modellen te valideren.

De diverse aspecten van het probleem

Een andere specificiteit met betrekking tot het beheer van de radioactieve afvalstoffen is de diversiteit aan aspecten waarmee uiteraard dient rekening gehouden bij de beslissingen van de keuze van de sites maar tevens op het gebied van strategie op lange termijn.

Het eerste aspect houdt rechtstreeks verband met een duidelijke socio-politieke dimensie die ruim verspreid is door de media en ons bijgevolg niet vreemd is; daarentegen omvat het tweede aspect meer ethische problemen die slechts veel recenter in het licht werden gesteld.

In de voorgaande paragrafen heeft men bij voorbeeld de alternatieven op het stuk van doorgedreven heropwerking van verbruikte splijtstof op langere termijn besproken. Een ander aspect is de aanvaarding van omkeerbaarheidscriteria van de ondergrondse opslagplaats. In sommige landen is deze omkeerbaarheid een dwingende eis. Alle alternatieven die betrekking hebben op het finale stadium van de splijtstofcyclus dienen overwogen en geëvalueerd, zowel op het niveau van de uitvoerbaarheid als op het niveau van de veiligheid. De te volgen strategieën, waaronder meer bepaald de verantwoordelijkheid over de opslagplaats, dienen echter gedragen door de maatschappij die van de geproduceerde energie genoten heeft en mogen niet worden afgewenteld op de toekomstige generaties.

- ² In deze optiek is de berging in een geologische laag die sinds miljoenen jaren stabiel is, de enig geldige oplossing voor zover ze correct bestudeerd en uitgevoerd wordt. Ingeval van geologische berging dient ook geen effectieve controle te worden uitgevoerd, die wel vereist is voor elke andere optie; deze controle is concreet gezien ondenkbaar voor de periodes waarover het gaat. Dat de omkeerbaarheid mogelijk gemaakt of vergemakkelijkt wordt op het niveau van concept voor een korte periode (een honderdtal jaren) na sluiting van de opslagplaats is een maatregel die, hoewel zij à priori tegenstrijdig is met het principe van de definitieve berging in de ondergrond, kan overwogen worden om de aanvaarding door het publiek te bevorderen en het vertrouwen in de voorgestelde systemen te vergroten.

Het beheer van de radioactieve afvalstoffen veronderstelt eveneens dat wordt rekening gehouden met de eventuele effecten op de gezondheid van de mens en op het milieu over de landsgrenzen heen, en met de afwezigheid van buitenmatige belastingen voor de komende generaties waarvan de bescherming uiteraard dient verzekerd. De OESO en het IAEA (Internationaal Agentschap voor Atoomenergie) hebben diverse collectieve opinies gepubliceerd die het advies van de deskundigen over het onderwerp overnemen. Deze opinies worden trouwens gedeeld door de Europese Commissie. Hier eveneens zou het beheer van de radioactieve afvalstoffen een pioniersrol kunnen vervullen en als voorbeeld dienen voor andere activiteiten die gericht zijn op de bescherming van het milieu.

2

Radioactieve afvalstoffen en conditionering

Teneinde het volume van de radioactieve afvalstoffen te verkleinen en hen de vereiste eigenschappen voor berging mee te geven, worden de afvalstoffen behandeld en verwerkt. De keuze van de behandelings- en conditioneringsoperaties is afhankelijk van de fysische en chemische aard van de afvalstoffen. Dit hoofdstuk beschrijft enerzijds de aard en de hoeveelheden geconditioneerde radioactieve afvalstoffen die in België dienen beheerd en anderzijds de voornaamste types van behandeling en conditionering die op de afvalstoffen worden toegepast.

2.1 Inventaris van de radioactieve afvalstoffen in België

De radioactieve afvalstoffen worden voornamelijk geproduceerd tijdens alle etappes van de splijtstofcyclus, namelijk:

- tijdens de splijtstoffabricage, door de fabrieken van "Franco-Belge de Fabrication de Combustibles International" (FBFCI) voor de produktie van uraniumoxyde en BelgoNucleaire (BN) voor de produktie van mengoxyden (Mixed OXide of MOX),
- tijdens de uitbating van de kerncentrales van Doel en Tihange en
- tijdens de opwerking van bestraalde splijtstof door de COmpagnie GENérale des MATières nucléaires (COGEMA) in Frankrijk.

Van de andere afvalstoffen is een belangrijk deel afkomstig van het internationaal opwerkingsprogramma van de oude fabriek van Eurochemic te Dessel. Door de aard van de activiteiten van de installaties van Eurochemic, zal het grootste gedeelte van deze afvalstoffen bestemd zijn voor ondergrondse berging.

Het resterende gedeelte is afkomstig van het nucleair onderzoek dat hoofdzakelijk wordt uitgevoerd door het Studiecentrum voor Kernenergie (SCK•CEN) en de Belgische universiteiten, van de produktie van radioisotopen door het Nationaal Instituut voor RadioElementen (IRE) en tenslotte van het gebruik van radioisotopen in de geneeskunde, de industrie en de private laboratoria.

De totale hoeveelheden geconditioneerde radioactieve afvalstoffen die in België dienen te worden beheerd, worden gegeven in tabel 1. Deze cijfers vertegenwoordigen de som van de bestaande geconditioneerde afvalstoffen en van de produktievooruitzichten van geconditioneerde afvalstoffen, met inbegrip van de afvalstoffen die verband houden met de ontmanteling van nucleaire installaties. Deze hoeveelheden zijn gebaseerd op de veronderstelling dat het huidig electronucleair programma wordt behouden, met andere

woorden een park van zeven kernreactoren die gedurende 40 jaar functioneren voor een totaal geïnstalleerd vermogen van 5,5 GWe.

De opties voor totale en gedeeltelijke heropwerking van de bestraalde splijtstof zijn eveneens in aanmerking genomen in tabel 1. De optie voor gedeeltelijke heropwerking houdt enkel rekening met de huidige opwerkingscontracten, dit wil zeggen de opwerking van 630 ton uranium, of ongeveer 10% van de totale hoeveelheid uranium dat door de centrales wordt gebruikt tijdens hun uitbating. De opwerking van verbruikte splijtstof biedt duidelijk de mogelijkheid om het volume van de afvalstoffen bestemd voor geologische berging te reduceren met 4.800 m³.

Het volume afvalstoffen geproduceerd door de kerncentrales van Doel en Tihange en die kunnen opgeslagen worden aan de oppervlakte bedraagt 42.300 m³. Deze hoeveelheid is voor bijna 2/3 (27.000 m³) samengesteld uit afvalstoffen die ontstaan uit de ontmanteling van kerncentrales en voor de rest uit uitbatingsafvalstoffen die geconditioneerd werden door de centrales (9.200 m³) of door Belgoprocess, een industriële dochtermaatschappij van NIRAS (6.100 m³). Belgoprocess beschikt inderdaad over diverse installaties voor de behandeling en conditionering van radioactieve afvalstoffen waaronder de CILVA-installatie voor vaste radioactieve afvalstoffen met lage activiteit.

Het grootste deel van de afvalstoffen die geproduceerd worden door de centrales en bestemd zijn voor geologische berging (800 m³) ontstaan door de ontmanteling van de centrales.

Tabel 1

Inventaris van de geconditioneerde radioactieve afvalstoffen in België /9,10/

Afvalstoffen die bestemd kunnen zijn voor bovengrondse berging (TYPE A)		
Activiteitssector	Geraamd volume (in m³)	
Electriciteitsproductie (5,5 GWe, 40 jaar)		
* centrales (KCD, CNT)	42 300	
* splijtstoffabricage (BN, FBFC)	1 100	
onderzoek en geneeskunde	2 300	
andere nucleaire installaties	11 000	
productie	56 000	
Afvalstoffen die bestemd moeten worden voor ondergrondse berging (TYPES B en C)		
Activiteitssector	Geraamd volume in (m³)	
	totale opwerking	gedeeltelijke opwerking
Electriciteitsproductie		
* centrales (KCD, CNT)	800	800
* splijtstoffabricage (BN, FBFC)	1 100	1 100
* splijtstofopwerking (COGEMA) 1	2 500	900
Berging niet-opgewerkte splijtstof	-	6 400
Andere nucleaire installaties²	5 300	5 300
Totale productie	9 700	14 500

De hoeveelheden radioactieve afvalstoffen bestemd voor bovengrondse berging (56.700 m³) zijn lager dan de oorspronkelijk voorziene hoeveelheden. Deze daling is hoofdzakelijk het gevolg van de voortdurende inspanningen van de producenten om de productie van afvalstoffen te verminderen en van de nederwaartse herziening van de hoeveelheden afvalstoffen afkomstig van de ontmanteling.

- 1 Deze afvalstoffen zijn samengesteld uit 100 m³ verglaasd afval, 100 m³ gebetumineerd afval en 700 m³ gebetoneerd afval voor de optie van gedeeltelijke opwerking. Voor de optie totale opwerking dienen hierbij 600 m³ verglaasd afval en 1000 m³gecompacteerd afval bijgeteld. /11/
- 2 Een belangrijk deel van dit afval is afkomstig van de voormalige opwerkingsfabriek Eurochemic, namelijk 300 m³ verglaasd afval en 2800 m³ gebetumineerd afval /16/.

Het dient vermeld dat de inventaris van de Belgische radioactieve afvalstoffen die in tabel 1 wordt gegeven, geen rekening houdt met 33.000 m³ radiumhoudende

afvalstoffen die geproduceerd werden tijdens de uitbating van de fabriek MHO (Metallurgie Hoboken Overpelt), dochtermaatschappij van Union Minière, voor de productie van radium en die opgeslagen werden op een speciale site. Het totaal volume van de afvalstoffen, alle categorieën en producenten samen, bedraagt dus ongeveer 100.000 m³.

2.2. Behandeling en verwerking van radioactief afval

Het basisprincipe van de operaties voor behandeling en verwerking van afval berust op de concentratie en immobilisatie van de radioactiviteit. Deze operaties dienen het dus mogelijk te maken een af te voeren collo (afvalstoffen in hun eindverpakking) te bekomen met een optimale volumereductiefactor, dit met het oog op een beperking van hun hoeveelheid en bijgevolg van de kosten voor opslag en berging. Ook dient het geconditioneerd afval dermate stabiel te zijn dat de radio-isotopen die zij bevatten geïsoleerd worden van de biosfeer gedurende de tijd die nodig is om radiologisch onschadelijk te worden.

Het voornaamste objectief van de behandelingsoperaties bestaat erin het volume van de afvalstoffen te reduceren (samenpersing van de samendrukbare afvalstoffen, verbranding van de brandbare afvalstoffen, enz.) of de radioactiviteit uit te verwijderen (verdamping of uitvlokking van de vloeibare effluënten, enz.).

De afvalstoffen die bekomen werden na de behandelingsoperaties worden vervolgens verwerkt. Om dit te doen worden ze in een vaste matrix gekapseld. Deze matrix vormt de eerste barrière tegen de dispersie of de eventuele migratie van de radioelementen naar het milieu. De keuze van de matrix hangt af van de chemische en fysische aard van de afvalstoffen. Momenteel worden vier matrixtypes gebruikt voor de conditionering van het Belgisch radioactief afval: beton, bitumen, glas en polymeren.

Beton wordt frequent gebruikt voor de conditionering van vaste en soms vloeibare (slib) afvalstoffen. Het biedt talrijke voordelen: niet-brandbaar, goede mechanische weerstand, eenvoudig aan te wenden en alkalisch karakter dat de retentie van talrijke radioisotopen bevordert. Het betonneren van metalen die makkelijk oxyderen, zoals aluminium, wordt echter niet toegepast. Door een reactie met het beton kunnen deze metalen immers waterstof produceren tijdens de conditionering, waardoor het risico bestaat dat de kwaliteit van het beton wordt aangetast.

Beton wordt gebruikt door:

- kerncentrales voor de conditionering van afvalstoffen zoals verdampingsconcentraten, ionenwisselingsharsen (uitsluitend voor de centrale van Doel) en filters, in standaard vaten van 400 l,
- Belgoprocess om bij voorbeeld de "wafels" te omhullen die bekomen worden door samenpersing van vaten van 200 l, die dan in een standaard vat van 400 liter worden geplaatst,
- COGEMA, voor de conditionering van technologische en specifieke afvalstoffen (bijvoorbeeld hulzen en eindstukken afkomstig van de splijtstofopwerking). Voor de nieuwe contracten die zouden kunnen afgesloten worden met COGEMA, zouden de technologische en andere afvalstoffen echter worden samengeperst en, zonder betonnering, in een metalen vat geplaatst; de samenpersing bij hoge druk van hoofdzakelijk metallische afval, levert een geconditioneerde afvalvorm op met grote mechanische cohesie, hetgeen de risico's voor dispersie van de radio-isotopen tijdens de berging beperkt en bovendien de volumes aanzienlijk verkleint.

Bitumen wordt voornamelijk gebruikt voor het inkapselen van de behandelingsresidu's van vloeibare afvalstoffen: uitvlokkings-slib en verdampingsconcentraten. De inkapselingsgraad van deze residu's, en bijgevolg de volumereductiefactor die het gevolg is van de bitumisering, is duidelijk gunstiger dan deze voor de betonnering van dezelfde residu's. Bitumen kan tot 40 gewichtpercent vaste stof bevatten tegen slechts 10 à 20% voor beton. Bitumen kan eveneens gebruikt worden voor de conditionering van vaste afvalstoffen die niet kunnen geconditioneerd worden door betonnering zoals bij voorbeeld de afvalstoffen die belangrijke hoeveelheden aluminium bevatten. Bitumen bezit niet

voldoende mechanische stijfheid en zijn gebruik vereist beschermingsmaatregelen tegen brand. Om deze reden hebben sommige landen, waaronder de Verenigde Staten en Japan, beslist geen gebruik meer te maken van bitumen voor de conditionering van hun afvalstoffen.

Bituminering wordt courant gebruikt door Belgoprocess voor de conditionering van de residu's afkomstig van de behandeling van vloeibare afvalstoffen in standaard vaten van 400 liter. Daarenboven werd bijna 2.800 m³ gebitumineerd afval geproduceerd tijdens de uitbating van de voormalige opwerkingsfabriek Eurochemic. Een honderdtal m³ gebitumineerd afval afkomstig van de opwerking van verbruikte splijtstof te La Hague zal bovendien naar België terugkeren. Hier dient vermeld dat bitumen een probleem kan stellen op het stuk van verenigbaarheid met de bergingssite. Het bitumen dat te La Hague wordt geproduceerd is tamelijk vloeibaar hetgeen zijn eventuele afbraak versnelt. Het is eveneens gebleken dat het bitumen dat door Eurochemic wordt geproduceerd een snelle uitloging van nitraten en een belangrijke zwelling vertoonde. Vooraleer de beslissing te treffen dergelijke afvalstoffen in klei te bergen zijn dus aanvullende studies vereist.

Borosilicaatglas is momenteel het referentiemateriaal voor de conditionering van de hoog-radioactieve vloeistoffen afkomstig van de opwerking van verbruikte splijtstof. Het bezit inderdaad talrijke voordelen: hoog warmtegeleidingsvermogen, lage uitlogingssnelheid, goede resistentie tegen straling, enz. In België zijn de verglaasde afvalvormen afkomstig van de opwerkingsfabriek van COGEMA en van de voormalige piloot-opwerkingsfabriek Eurochemic.

Polymeren hebben als voornaamste voordeel dat zij een grotere weerstand hebben tegen uitloging dan beton. Zij zijn echter veel duurder dan beton en vereisen een meer complexe installatie. Net zoals bitumen zouden bovendien bepaalde polymeren op lange termijn kunnen degraderen, waarbij dan complexe verbindingen gevormd worden die de mobiliteit van de actiniden mogelijks kunnen vergroten. In België worden enkel de ionenwisselingsharsen van de kerncentrale van Tihange geconditioneerd in een polymeermatrix. Hier eveneens dient de eventuele degradatie van dergelijke matrix en de eventuele gevolgen ervan voor de geologische berging, in de toekomst het voorwerp uit te maken van aanvullend onderzoek.

2.3 Trends in conditionering van radioactief afval

Gedurende de laatste jaren tekenen zich bepaalde tendenzen af tengevolge van uiteenlopende oorzaken: het streven naar een verdere volume-reductie van de te bergen colli, de problemen omtrent de aanvaarding van organisch en/of brandbaar afval in geologische berging, de evoluties in de splijtstofcyclus (recyclage van de brandstof, niet-heropwerking).

Deze evoluties vinden plaats op internationale schaal. Voor wat België betreft mag men zich eveneens verwachten aan ingrijpende veranderingen, ondermeer via het afval dat zal terugkeren uit Frankrijk.

Fundamentele evoluties die voor België belangrijk zijn:

- het in vraag stellen van de verenigbaarheid van organisch afval (bv cellulosehoudend afval, harsen) of een organische matrix (bv bitumen) met geologische berging;
- het ontwikkelen van nieuwe glazen en ceramische materialen (bv Synroc) voor conditionering van langlevend afval;
- het conditioneren van niet-heropgewerkte splijtstof.

2.4 Karakterisatie van het geconditioneerd afval /3/

Geconditioneerd afval moet aan zekere criteria voldoen.

Eenzijds moet het product beantwoorden aan de specificaties opgesteld door de uitbater van de conditioneringsinstallatie.

Anderzijds moet het geconditioneerd afval aanvaardbaar zijn voor (of compatibel met) de geologische bergingsite. Hiervoor worden aanvaardbaarheidscriteria voorzien.

In de praktijk wordt de kwaliteit van het geconditioneerd afval gewaarborgd door de kwaliteitsborging vanwege de conditioneerder, en door een systeem van kwalificatie en supercontrole vanwege de overheid.

Kwaliteitsborging door de conditioneerder omvat de systematische acties van controle, meting, enz. van de diverse onderdelen van het conditioneringsproces. Dit laat toe om de conformiteit van het eindproduct (geconditioneerd afval) met de specificaties te garanderen. Dergelijke aanpak werd gedurende de voorbije jaren in de diverse Belgische en buitenlandse bedrijven ontwikkeld en in praktijk gebracht. Eén van de belangrijke acties in dit verband bestaat uit de berekening van de concentraties van de zogenaamde kritische radionucliden voor berging (bv, ^{63}Ni , ^{135}Cs , ^{129}I , ^{238}U) uit de concentratie van gemakkelijk meetbare radionucliden ^{60}Co en ^{137}Cs . Deze studies hebben in belangrijke mate bijgedragen tot de betere karakterisatie van de geconditioneerde afvalstromen, en dus ook van het eindproduct.

Kwalificatie van de conditioneringsprocédés en supercontrole van de geconditioneerde afvalvormen is een tweede benadering. Hier heeft het SCK•CEN in opdracht van NIRAS/ONDRAF een belangrijke rol gespeeld. Diverse afvalvormen werden onderzocht op gebied van conformiteit, kwaliteit, samenstelling: cement, bitumen, glas, geproduceerd door de kerncentrale, Belgoprocess (Eurochemic), Cogéma (F), AEA (UK). Deze studies hebben aangetoond dat in de meeste gevallen de producten conform zijn aan de verwachting. In andere gevallen werden verschillen vastgesteld (bv ingeval van gecementeerde harsen), of werden onverwachte fenomenen waargenomen (bv veroudering van gebitumeerd afval).

Met de bevindingen van deze studies wordt degelijk rekening gehouden, hetzij door een aanpassing van het conditioneringsproces, hetzij via bijkomende evaluaties van de compatibiliteit met het bergingsconcept.

Wij menen tenslotte dat een systematische aanpak van supercontrole van de diverse types geconditioneerd afval door een onafhankelijke instelling noodzakelijk is teneinde voldoende garanties te bieden voor een correcte conditionering én berging. Het verdient aanbeveling dat deze supercontrole ook rekening houdt met de aanvaardingscriteria voor de diverse afvalvormen voor berging.

Internationale samenwerking speelt een heel belangrijke rol op gebied van karakterisatie en supercontrole van radioactief afval. Meer bepaald de Europese Commissie is zeker één van de drijvende krachten, bijvoorbeeld via het "European Network of Laboratories for the Quality Checking of Waste Packages" /4/. Het SCK•CEN neemt hieraan deel. Dit netwerk probeert tot een harmonisatie te komen van de verschillende meettechnieken en procedures voor afvalcolli. Ook via uitwisseling van informatie en het opstarten van gezamenlijke onderzoeksprojecten wordt een grotere mate van vertrouwen gecreëerd ten aanzien van de huidige praktijk van conditionering en berging van afval.

2.5. Verenigbaarheid van geconditioneerd afval met geologische berging

Het is van groot belang de verenigbaarheid van het geconditioneerd afval met de bergingsomgeving te kennen. De kennis van de mogelijke problemen laat o.m. toe om de overige kunstmatige barrières (container, opvulmateriaal) desgevallend aan te passen. Het SCK•CEN heeft sedert een 15-tal jaar grote aandacht besteed aan de interactie tussen het geconditioneerd afval en mogelijke bergingsomgevingen.

Verenigbaarheid wordt vooral bepaald via de degradatie (uitloging, corrosie) van de afvalvorm ten gevolge van interactie met de omgeving, meer bepaald via de vloeibare fase.

Afvalvormen

Onze inspanningen werden geconcentreerd op de twee van de belangrijkste afvalvormen in geval van geologische berging, namelijk glas (conditionering van het hoogactief afval) en bitumen (conditionering van middelactief afval). De discussie hieronder geldt voor de glazen en bitumens van verschillende origine (zie hoger, sectie 2.1).

Borosilicaat-afvalglas is een heel stabiele matrix voor de immobilisatie van hoogactief afval. Via een uitgebreid onderzoeksprogramma komen wij tot de conclusie dat afvalglas een efficiënte eerste barrière is /5/. De gemiddelde degradatie bedraagt $0.3 \mu\text{m/j}$ in rechtstreeks contact met Boomse klei en bij omgevingstemperatuur van 16°C , zodat de verwachte levensduur van een reële glasblok zo'n 600000 j zou bedragen. Hieraan moeten wij toevoegen dat de reële milieu's waarmee het glas zal reageren (het opvulmateriaal) minder agressief zijn dan Boomse klei, wat de levensduur van het afvalglas zal ten goede komen. Het werd proefondervindelijk vastgesteld dat de degradatie van het afvalglas sterk temperatuurgevoelig is. Bij 90°C bv bedraagt de degradatiesnelheid tussen 20 en $300 \mu\text{m/j}$, afhankelijk van het type glas. Dit betekent dat men een bijkomende veiligheidsfactor inbouwt door het gebruik van een container die rechtstreeks contact tussen het glas en de bergingsomgeving tijdens de thermische fase belet.

Wij hebben ook SYNROC, dat door Australische onderzoekers is voorgesteld als alternatief voor glas onderzocht. Synroc blijkt inderdaad veel stabielere te zijn in contact met Boomse klei, en dit verschil is vooral bij hogere temperatuur (bv 90°C) opvallend. De geschatte verbetering in stabiliteit bedraagt een factor 10 tot 100 /6/.

Naast de stabiliteit van de afvalvorm in het bergingsmilieu zelf is de mate van immobilisatie van de langlevende radionucliden een zeker even belangrijk aspect van "verenigbaarheid". De belangrijkste radionucliden ingeval van het hoogactief afval zijn ^{237}Np , ^{99}Tc , ^{241}Am en ^{239}Pu . Welnu, wij konden aantonen dat deze radionucliden alle trager uitlogen dan de glasmatrix zelf: van 3x (Np, Tc) tot 40x (Am). Belangrijk is ook dat de concentratie van deze radionucliden in de vloeistoffase beperkt is tot een maximale waarde, de zogenaamde oplosbaarheid. Deze maximale concentraties zijn beduidend laag, wat tot een bijkomende veiligheidsfactor leidt: (in M): 10^{-7} (Np), 10^{-8} (Pu), 10^{-11} (Am). Veruit de grootste fractie van de uitgeloopte radionucliden wordt gesorbeerd op de kleimaterie.

Gebitumeerd afval heeft een andere samenstelling en structuur dan glas, en gedraagt zich ook fundamenteel op een verschillende manier /7/. Uit onze onderzoeken blijkt evenwel dat de uitloging van de belangrijke, langlevende radionucliden eveneens sterk beperkt is door fenomenen van oplosbaarheid in het corroderend milieu: we meten maximale concentraties in oplossing voor Pu en Am (in M) tussen 10^{-10} en 10^{-13} , wat geruststellend is. Anderzijds echter logen oplosbare zouten zoals NaNO_3 binnen naar schatting 20000 j volledig uit een vat gebitumeerd afval uit bij rechtstreeks contact met de omgeving. Dergelijke afvalvorm is dus slechts een beperkte barrière in het bergingsconcept.

Er zijn ook nog andere aspecten i.v.m. bitumen die verder onderzoek vergen: de zwellingsdruk tengevolge van het uitloogproces kan het "nabije veld" verstoren, de oplosbaarheid van de radionucliden kan stijgen tengevolge van complexatie met organische materie. Verder kan de veroudering van bitumen zijn gedrag in bergingsomstandigheden veranderen. Het SCK•CEN besteedt hier de nodige aandacht aan.

Containermateriaal

In België, en in vele andere landen, voorziet men een bijkomende verpakking van de verglaasde, hoogactieve afvalcolli in een metalen "overpack". De bedoeling ervan is dat

het glas geïsoleerd blijft van de bergingsomgeving gedurende de eerste 500 j van de berging. Tijdens deze periode is er nog een significante warmte-ontwikkeling vanwege de fissieproducten, en men wil het nabije veld zo weinig mogelijk verstoren. Het SCK•CEN heeft daartoe een aantal kandidaat-materialen onderzocht /8/. Zowel corrosie-resistente als niet-corrosie-resistente metalen werden bestudeerd: C-staal, roestvrije stalen, Ni- en Ti-legeringen.

De eerste keuze voor container-materiaal, nl C-staal, werd uiteindelijk niet langer weerhouden door de Belgische autoriteiten. Inderdaad, we stelden vast dat C-staal in contact met Boomse klei onderhevig is aan putcorrosie. Bij temperaturen van 90°C groeiden de putten a rato van 120 µm/j, wat onaanvaardbaar is. Weliswaar is de globale corrosie van C-staal relatief beperkt. Roestvrij staal blijkt niet onderhevig aan corrosie in contact met Boomse klei.

Daarom heeft NIRAS/ONDRAF beslist om roestvrij staal (AISI 316L) verder te onderzoeken, teneinde de kwaliteit ervan in alle denkbare omstandigheden (bv grote locale Cl- of thiosulfaat- concentraties) te kennen.

3

Berging van radioactief afval



3.1 Fundamentele principes en rol van de barrières

Het vierde basisprincipe van het IAEA betreft de bescherming van de toekomstige generaties. Het IAEA formuleert dit principe als volgt: "Radioactieve afval zal op een dusdanige manier beheerd worden dat de voorspelde impact op de gezondheid van toekomstige generaties niet groter zal zijn dan de relevante impactniveaus die nu als aanvaardbaar worden aanzien".^{12/} Het IAEA erkent hierbij dat een totale isolatie van het radioactiefafval over zeer lange termijn niet mogelijk is, maar dat het de bedoeling van het beheer moet zijn om een redelijke verzekering te bekomen dat er zich geen onaanvaardbare gevolgen voor de menselijke gezondheid zullen voordoen. Dit wordt typisch gerealiseerd door gebruik te maken van een multibarrière benadering waarbij zowel natuurlijke als kunstmatige barrières worden gebruikt. De rol die aan de verschillende barrières wordt toebedeeld is sterk afhankelijk van het type afval en het type gastformatie.

Voor het radioactief afval van type A dat in aanmerking komt om aan de oppervlakte geborgen te worden, moeten de kunstmatige barrières zorgen voor de veiligheid op relatief korte termijn, nl. enkele honderden jaren. Over deze periode daalt de radiotoxiciteit van dit afval sterk ten gevolge van het radioactief verval. De kunstmatige barrières bemoeilijken ook de intrusie bij bv. constructiewerken. Vandaar dat landbergingsinstallaties voor dit type afval bestaan uit betonnen bunkers die bedekt worden door een meter dikke eindafdekking bestaande uit grond, klei en drainagelagen. De natuurlijke barrière moet ervoor zorgen dat de kleine hoeveelheden radionuclides die op lange termijn toch uit de bergingsinstallatie zouden kunnen ontsnappen niet tot onaanvaardbare gevolgen voor de gezondheid van de bevolking kunnen leiden. Hiertoe gaat men bij de site selectie gebieden zoeken met gunstige geologische en hydrologische omstandigheden.

Voor het afval van type B en C, waarvoor in België de geologische berging in een plastische kleilaag wordt bestudeerd, zorgen de gunstige hydraulische, geochemische en geomechanische eigenschappen van het gastgesteente voor de veiligheid. De rol van de kunstmatige barrières beperkt zich hier hoofdzakelijk tot het beschermen van de natuurlijke barrière tegen mogelijke nadelige effecten veroorzaakt door het afval of door de constructiewerken nodig om het afval te bergen. Zo zal men om de convergentie van de klei rond de galerijen te vermijden, een stijve bekleding plaatsen en zal men de galerijen met klei of beton opvullen. Een sterke convergentie van het kleimassief is namelijk nadelig t.o.v. zijn rol van barrière en zou bijvoorbeeld tot de vorming van barsten in klei kunnen leiden. Het beton zorgt bovendien voor gunstige geochemische omstandigheden, die de oplosbaarheid van radionuclides bij de bron sterk kunnen beperken. Voor verglaasd hoog radioactiefafval of gebruikte splijtstof, dat, gedurende enkele honderden respectievelijk enkele duizenden jaren warmte produceert, zorgt een

roestvrijstalen bergingsbuis of mantel ervoor dat gedurende deze periode er zich geen vrijzetting van radionuclides kan voordoen.

3.2 Mogelijkheden voor de verschillende afval types

Voor het afval van type A worden drie opties toegepast, namelijk opslag gedurende lange termijn, t.i.z. honderd jaar of langer, berging aan de oppervlakte of geologische berging op geringe (< 100 m) of grote diepte (>200 m) in graniet of zout. In Nederland werd gekozen voor de opslag op lange termijn en werd door COVRA een opslaginstallatie gebouwd te Borsele. Berging aan de oppervlakte wordt momenteel reeds toegepast in bv. Spanje en Frankrijk. In Zweden en Finland wordt laag- en middelactief afval geborgen op een diepte van 50 tot 100 m in graniet onder de zee of aan de kust. In Duitsland wordt laag radioactief afval in een verlaten zoutmijn geborgen.

Voor het afval van type B en C worden internationaal drie types gastformaties bestudeerd nl. harde gesteentes zoals bv. graniet in Zweden, Finland, Zwitserland, tuff in de VSA, zout onder de vorm van zoutkoepels of zoutlagen zoals respectievelijk in Duitsland, Nederland en de VSA en klei zoals in België, Spanje, Frankrijk, Zwitserland en Nederland. In België komen geen zoutlagen voor en graniet of andere geschikte kristallijne rotsen komen slechts op zeer grote (>1000 m) diepte voor.

Stand van zaken voor het afval van type A

Het NIRAS heeft eind juni 1997 een rapport aan de regering overgemaakt, waarin de drie opties voor de berging van laagradioactief afval, nl. lange termijn opslag, berging aan de oppervlakte en geologische berging in klei worden vergeleken zowel qua veiligheid als qua kostprijs /9/. De voornaamste conclusies per optie worden hieronder kort weergegeven.

De opslag op lange termijn is geen finale oplossing. Op het einde van de opslag, na bv. honderd tot driehonderd jaar, is nog steeds de berging van het afval of een andere aanvaardbare oplossing vereist. Dit verplicht dus de toekomstige generaties tot ingrijpende acties. Om deze reden is deze optie ethisch minder aanvaardbaar. Technisch is deze oplossing goed gekend en is ze veilig. De kosten op korte termijn zijn relatief laag, doch op lange termijn worden ze heel onzeker en mogelijk hoog. Deze optie is zeer flexibel: men kan op elk ogenblik beslissen om het afval uit de opslaginstallatie te halen om het een andere bestemming te geven.

De berging aan de oppervlakte wordt in België reeds sinds de stopzetting van de zeedumping in 1982 bestudeerd. Door het SCK•CEN werden in opdracht van het NIRAS verschillende veiligheidsstudies uitgevoerd. Hieruit bleek dat deze optie veilig is. De acties a priori vereist van toekomstige generaties beperken zich tot het bewaken en controleren van de afgesloten installatie en is dus ethisch goed aanvaardbaar. Het NIRAS heeft reeds zowel conceptstudies als siteselectiestudies uitgevoerd. De siteselectiestudie /13/ werd publiek gemaakt in 1994 en leidde tot protest van zowat alle gemeenten waarin de 98 voorgestelde zones gelegen zijn. Alhoewel deze optie technisch goed gekend en veilig is en qua kosten gemiddeld is, stuit ze op een grote weerstand bij dat deel van de bevolking dat er mogelijk zal bij betrokken zijn. Deze optie is ook vrij flexibel daar men mits de nodige voorzieningen het afval relatief gemakkelijk kan terughalen om het een andere bestemming te geven.

De geologische berging van radioactiefafval van type A in de klei is tot nu toe weinig bestudeerd. Door de relatief lage radiologische inventaris in dit afval en de goede retentie eigenschappen van de klei is er qua radiologische veiligheid geen probleem. Er zijn echter met dit afval enkele problemen van niet radiologische aard verbonden. Het potentieel belangrijkste probleem hierbij is de gasvorming door anaerobe corrosie van koolstofstaal van de afvalvaten of aanwezig in het afval. Door de ondoorlaatbaarheid van klei kan deze gasvorming tot een gasdrukopbouw in de bergingsinstallatie leiden die ingeval van intrusie aanleiding kan geven tot niet verwaarloosbare risico's. De technische oplossingen hiervoor moeten nog bestudeerd worden. Deze optie is dus technisch minder

goed gekend. Naar de toekomstige generaties toe wordt geen enkele actie verwacht. Deze optie is echter vrij duur en weinig flexibel, i.h.b. na het afsluiten van de bergingsinstallatie.

Om de nieuwe opdrachten uit te voeren, die haar door de regering worden toevertrouwd in het raam van het beheer op lange termijn van het laagactief en kortlevend radioactief afval, heeft recent de Raad van Bestuur van NIRAS het werkprogramma voor de volgende drie jaar goedgekeurd. Dit programma voorziet dat einde 2001 concrete voorontwerpen voorgesteld worden van een berging die definitief is of bestemd is om definitief te worden, aan de oppervlakte of in de diepe ondergrond, zodat de regering met volledige kennis van zaken het of de uit te werken projecten kan kiezen. "Definitief of met definitieve bestemming" aangezien de berging tenminste tot de sluiting van de site, tegen 2060, volkomen omkeerbaar blijft, en zelfs nadien in het geval van oppervlakteberging. Die opdrachten zullen uitgevoerd worden volgens een socio-economische benadering met integratie en partnerschap als sleutelwoorden.

Stand van zaken voor het afval van type B en C

Reeds in 1974 begon SCK•CEN studies naar de mogelijkheid van geologische berging van radioactief afval van het type B en C in de Klei van Boom. Sinds het operationeel worden van het ondergronds laboratorium in 1984 is er een opmerkelijke vooruitgang geboekt in de studies betreffende de geomechanica en geohydrologie van de klei, de compatibiliteit van het afval en zijn container met de klei-omgeving en de geochemie en migratie-eigenschappen van radionuclides in de Boomse Klei. Uit de door het SCK•CEN uitgevoerde veiligheidsstudies PAGIS, PACOMA en UPDATING 90 /14,15,16/ en het door het NIRAS uitgegeven "Safety and Feasibility Interim Report", SAFIR I rapport /17/, blijkt dat de berging van deze types afval voldoet aan de radiologische veiligheidsnormen opgesteld door internationale organisaties zoals de ICRP en het IAEA. Uit een eerste veiligheidsstudie naar de directe berging van bestraalde splijtstof /18/ blijkt dat ook dit type afval vermoedelijk veilig in de Boomse Klei kan geborgen worden.

In het kader van een EC project en in opdracht van het NIRAS werkt het SCK•CEN aan een meer diepgaande studie van de berging in klei van gebruikte splijtstof. De hoge warmte productie van i.h.b. MOX splijtstof is hierbij een van de typische verschillen t.o.v. de berging van verglaasd hoog radioactief afval. De momenteel beperkte kennis rond het gedrag van gebruikte splijtstof en van andere speciale afvalstromen, zoals bv. de eurobitumen afkomstig van de vroegere Eurochemic opwerkingsfabriek in klei, geeft aanleiding tot belangrijke onzekerheden in de veiligheidsstudies. Ook de evaluatie van menselijke indringingsscenario's op lange termijn is onzeker.

Momenteel werkt het NIRAS in samenwerking met het SCK•CEN aan het SAFIR II rapport dat in 1998 zal gepubliceerd worden. In dit rapport zal een gedetailleerd overzicht gegeven worden van de stand van zaken van de berging van afval van type B en C. Tevens zal er een antwoord in gegeven worden op de vragen en opmerkingen van de evaluatiecommissie SAFIR I /19/ en van de Senaatscommissie voor nucleaire veiligheid /20/. In dit kader werd recentelijk door het NIRAS ook een studie gestart naar de eigenschappen van de Klei van Leper op grote diepte en dit als mogelijk alternatief voor de Klei van Boom. Hiertoe wordt er te Doel een kernboring uitgevoerd om na te gaan of de Klei van Leper een geldig alternatief vormt.

Ondertussen zijn in opdracht van de ESV PRACLAY (een samenwerkingsverband tussen het SCK•CEN en het NIRAS) de werken gestart voor de uitbreiding van het ondergronds laboratorium. Deze werken betreffen de bouw van een nieuwe schacht en een verbindingsgalerij. Deze uitbreiding is noodzakelijk om het PRACLAY demonstratie project te kunnen realiseren. Het doel van dit project is de demonstratie op ware grootte qua dimensie en warmteproductie van het huidig concept voor de berging van verglaasd hoog radioactief afval in de Boomse Klei. Ondertussen bouwt het SCK•CEN in opdracht van de ESV PRACLAY een grootschalige maquette van dit bergingsconcept. Een van de doeleinden is het testen van het thermo-hydro-mechanisch gedrag van het klei buffermateriaal.

4 Geologische berging

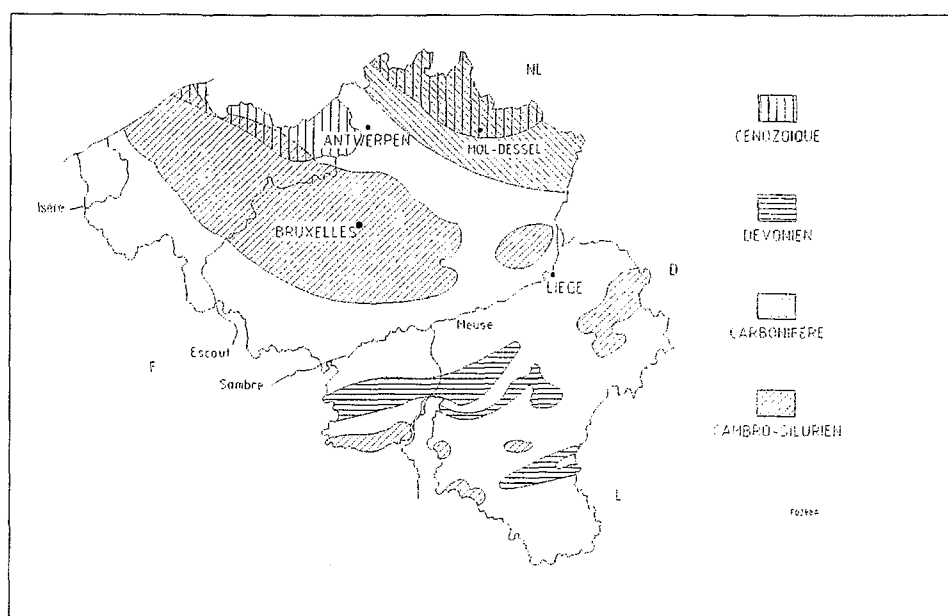
van geconditionneerd hoog en middel radioactief afval

4.1 Mogelijke gastformaties in België en weerhouden opties

Uit een studie, uitgevoerd in 1978 in opdracht van de Europese Commissie, naar geologische formaties die gunstige karakteristieken bezitten voor de berging van radioactief afval /21/ is gebleken dat in België enkel klei- en schieferlagen in aanmerking komen (zie figuur 1).

Figuur 1

Potentiële geologische formaties voor berging van hoog radioactief afval



In parallel met het onderzoek van het SCK•CEN naar de mogelijkheden voor de berging van hoog radioactief afval in de Boomse Klei onder de nucleaire site te Mol, hebben een studie uitgevoerd door de Belgische Geologische Dienst /22/ alsook de evaluatiecommissie SAFIR I /19/ bevestigd dat de site van Mol in aanmerking komt als mogelijke site voor geologische berging.

Dezelfde commissie heeft in 1990 aanbevolen dat naast de site van Mol ook een alternatieve lokalisatie zou onderzocht worden, zoals de Ieperse Klei onder de nucleaire site van Doel. Voor deze site wordt eind 1997 een eerste geologische verkenningss boring uitgevoerd in opdracht van het NIRAS.

4.2 Concepten

Een eerste conceptstudie werd in 1979 uitgevoerd door het SCK•CEN. Het voorgestelde concept wordt dikwijls de "duizendpoot" genoemd, omdat het verglaasd afval in schuine boorgaten onderaan de transportgalerij geplaatst wordt.

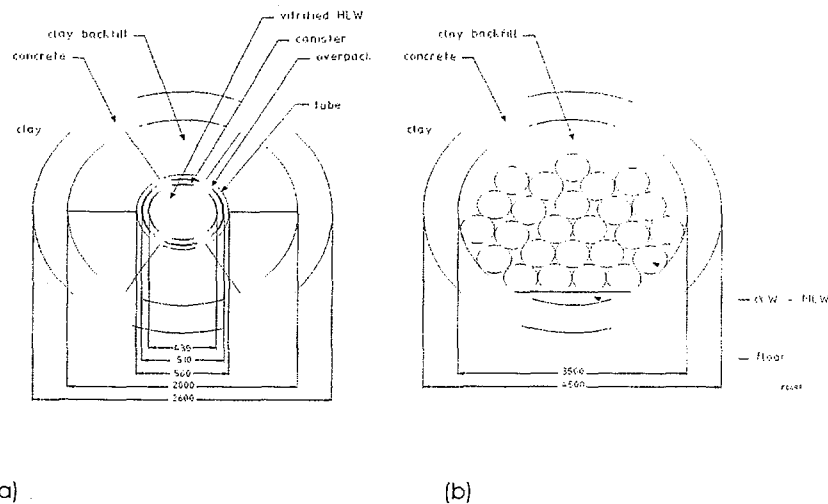
Uit de resultaten van de eerste performantieanalyse PAGIS /14/ is gebleken dat de effectieve dikte van de kleilaag één van de sterkst beïnvloedende parameters van het bergingssysteem is. Om te vermijden dat de dikte van kleibarière verminderd wordt door de constructie, worden sinds 1990 enkel concepten beschouwd waarbij alle uitgravingen in een horizontaal vlak plaatsvinden.

In het concept beschreven in het SAFIR I rapport /17/ wordt het afval in galerijen geplaatst. Er werd ook een gecombineerde berging voorgesteld waarbij de onderste helft van een bergingsgalerij opgevuld wordt met vaten middel actief afval en in de bovenste helft zou één vat van hoog actief verglaasd afval geplaatst worden. Deze gecombineerde berging wordt niet langer in aanmerking genomen om ongewenste interacties tussen de verschillende afvalvormen te vermijden. Voor wat betreft middel actief afval worden de afvalvaten in de sectie van de bergingsgalerij opgestapeld (zie [figuur 2.b](#)). De ruimte tussen de vaten wordt opgevuld door injectie van beton.

Het meest recente concept (11/97) voor verglaasd hoog actief afval voorziet dat elk vat in een roestvrijstalen mantel (overpack) met een wanddikte van minimum 3 cm verpakt wordt. In de bergingsgalerij wordt een centrale buis voorzien, uit roestvrij staal en met een dikte van 1 cm, waarin de mantels geplaatst worden. De ruimte tussen de centrale buis en de galerijwand wordt opgevuld met een mengsel van klei, zand en grafiet (zie [figuur 2.a](#)).

figuur 2

Doorsnede bergingsgalerij voor hoog (a) en midden (b) radioactief afval



Een alternatief voorstel van bergingsconcept bestaat in de rechtstreekse plaatsing van de hoogactieve afvalcolliës (canister plus overpack) in horizontale boorgaten zonder verbuiging. De diameter van de boorgaten is een paar centimeters groter dan de

diameter van de collies. Door de convergentie van de klei onder invloed van de litostatische druk worden de collies door de klei ingesloten, en is de afsluiting verzekerd. Een mogelijk voordeel van dit alternatief concept is de minimale grondverplaatsing en de minimale verstoring van de gasformatie. De toepassing van een multibarrière benadering is wel minimaal maar voldoende wat de Cogema canisters betreft; voor het eventueel in rekening nemen van terughaalbaarheid kan altijd het concept licht aangepast worden met bijkomende verbuizing.

4.3 R&D Programma

Wegens de beschikbaarheid van beloftevolle kleiformaties en de beperkte keuze in België aan andere mogelijke gasformaties voor de berging van hoogradioactief afval werd reeds in een vroeg stadium (1974) de Boomse Klei formatie als mogelijke kandidaat onderzocht.

Een bijkomend argument voor de Boomse Klei was de beschikbaarheid op een diepte tussen 180 en 280 meters onder de nucleaire site van het SCK•CEN, wat het oprichten van een experimentele site kon vergemakkelijken. De eerste belangrijke vraag welke hierbij moest beantwoord worden was:

"Zijn de eigenschappen van de Boomse Klei voldoende beloftevol om als gasformatie voor een bergplaats voor geologische berging van hoogradioactief afval te worden gebruikt om een eerste onderzoeksfase te starten?"

Daarom werd in 1975 een eerste kernboring uitgevoerd op het terrein van het SCK•CEN, en werden er thermische, sorptie en corrosietesten gestart in een open kleiput in Terhagen. De eerste resultaten gaven de volgende beloftevolle eigenschappen voor de Boomse Klei:

- goede sorptie voor kationen;
- chemische en mineralogische stabiliteit;
- voldoende hoge warmtegeleidbaarheid;
- zeer lage hydraulische geleidbaarheid;
- zeer lage diffusieconstante voor niet gesorbeerde species;
- plastisch gedrag waardoor zelfhelend voor barsten.

Nadat de resultaten van dit preliminaire onderzoek bekend waren werd een eerste berekening gedaan van de toelaatbare thermische belasting om de nodige oppervlakte van een mogelijke bergplaats te bepalen, ook werd een eerste voorlopig ontwerp voor een bergplaats gemaakt en werd een eerste risico analyse uitgevoerd. Het plastisch gedrag deed wel vragen rijzen in verband met de mogelijkheden van de constructie van tunnels op grote diepte. Daar de resultaten van dit eerste onderzoek voldoende beloftevol waren, werd in 1980 de beslissing genomen om in de Boomse klei onder het SCK•CEN op een diepte van 223 meters een ondergronds labo te bouwen. Dit moest toelaten om de eigenschappen van de Boomse Klei op grote diepte en onder in situ voorwaarden te bestuderen. Vanaf dan was het onderzoek specifiek formatie en plaats gebonden.

De bouw van het ondergronds laboratorium, samen met de experimentele schacht en de test galerij, heeft aangetoond dat het mogelijk is om in de Boomse Klei op grote diepte galerijen te bouwen zonder de grond te bevriezen of de mechanische eigenschappen door een andere techniek te versterken. Ook werden grootschalige in situ experimenten gestart voor corrosie van containermaterialen en afvalvormen, voor de migratie van radionucliden, voor de studie van de warmteoverdracht, en de in situ meting van de hydraulische eigenschappen.

Als hierboven vermeld werden in 1988 de resultaten van het onderzoek sedert 1974 gebundeld in het SAFIR I rapport /17/ en werd het onderzoek bijgestuurd door de aanbevelingen van de aangestelde evaluatiecommissie /19/.

Door de resultaten van de PAGIS studie /14/ werden de migratiestudies beter gericht op de radionucliden belangrijk voor de veiligheid van een geologische berging.

Nu is het R&D programma voor de geologische berging van hoogradioactief afval vooral toegespitst op de studie van de barrière eigenschappen van de gastformatie (de Boomse Klei) en de studie van opvul en afdicht materialen. Ook in het meerdere barrière principe voor de berging in klei, is de gastformatie de belangrijkste barrière. De overige barrières geven extra bescherming, vooral om te voorkomen dat radionucliden zouden vrijkomen tijdens de fase van hoge afgifte van warmte en straling.

Daarom wordt vooral onderzoek verricht in de volgende gebieden:

- studie van de migratie van radionucliden door de Boomse klei;
- studie van de invloed van opgelost organisch materiaal in het kleiwater op de migratie van radionucliden;
- studie van de productie en van de migratie van gassen vanuit een berging in klei;
- studie van opvul- en van afdichtingsmaterialen voor galerijen en schachten in klei;
- en in mindere mate de studie van de verandering van de eigenschappen van de klei onder invloed van straling en temperatuurstijging.

De belangrijkste eigenschappen waarom de Boomse klei weerhouden werd als een mogelijke kandidaat gastformatie waren met de tijd bevestigd; in de praktijk, worden de volgende gegevens bepaald:

- $2 \cdot 10^{-12} \text{ m s}^{-1}$ voor de hydraulische geleidbaarheid;
- $2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ als diffusieconstante voor niet vertraagde radionucliden;
- 8.3 voor de pH, teken van het licht alkalische karakter;
- -260 mV voor Eh die de sterk reducerende omgeving weergeeft.

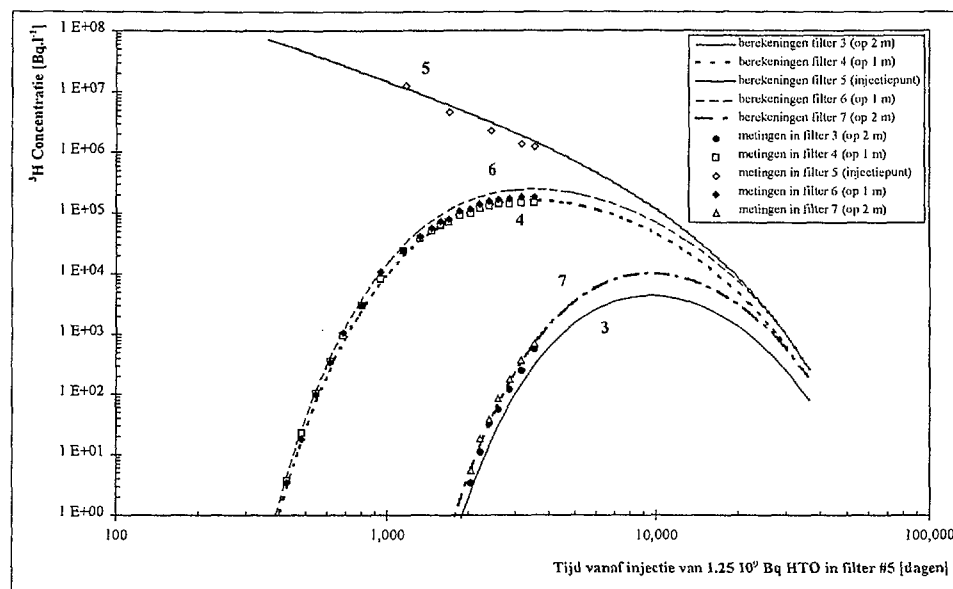
De sterke sorptie voor kationen als de zelfdichtende eigenschappen zijn moeilijker te becijferen.

Een belangrijk doel van het onderzoek is de studie van de basis processen en het ontwikkelen van wiskundige modellen voor de berekening van de migratie van radionucliden en gassen door de klei, het meten van de modelparameters en het aantonen van de betrouwbaarheid van deze modellen en parameters. Voor het onderzoek naar de migratie van radionucliden door de Boomse klei wordt gebruik gemaakt van labo en in situ migratieëxperimenten in het ondergronds laboratorium.

De modelparameters voor de beschouwde radionucliden worden gemeten op kleikernen door diffusie en percolatieëxperimenten. Voor het aantonen van de betrouwbaarheid van de modellen en de parameterwaarden worden grootschalige in situ experimenten uitgevoerd /23/. De resultaten van een dergelijk grootschalig in situ experiment voor de migratie van getritieerd water door de Boomse Klei is weergegeven in *figuur 3*. Deze figuur toont een zeer goede overeenkomst tussen de modelberekening en de experimenteel gemeten waarden voor injectiefilter (nr. 5) en filters op afstand van 1 en 2 meter over een tijdsperiode van meer dan 9 jaar. De studie van de generatie van waterstofgas door anaërobe corrosie van koolstofstaal en de migratie van het gas door de klei gebeurt eveneens door experimenten op kleikernen en door grootschalige in situ experimenten.

Figuur 3

Resultaten van berekende (volle lijnen) en gemeten concentraties (symbolen) in de filters 3 tot 7



In het ondergronds laboratorium worden verder grootschalige experimenten uitgevoerd om de invloed van straling en verwarming op de eigenschappen van de klei na te gaan, om de doenbaarheid en de kwaliteit van opvulling en afdichting van galerijen en schachten te bestuderen, en om de hydraulische eigenschappen van de klei en kleimaterialen op grote schaal te meten. Om de kwaliteit en het vertrouwen in de resultaten te verhogen, wordt het merendeel van dit onderzoek verricht in het kader van internationale projecten met multidisciplinaire groepen.

De resultaten van het R&D programma worden rechtstreeks gebruikt bij de performantiestudies, en door een nauwe samenwerking wordt het onderzoek bijgestuurd door de behoefte aan gegevens voor de performantiestudies.

De EVEREST studie /24,25/ heeft het sterke belang voor de veiligheid aangetoond van de volgende parameters: de dikte en homogeniteit van de kleilaag, de diffusiekonstanten van de belangrijke radionucliden, de goede afdichting van galerijen en schachten, en de migratie van radionucliden door complexatie met het opgelost organisch materiaal in het klevwater. Daarom moet het onderzoek hiervan dan ook voortgezet worden.

4.4 Performantiestudies

Een performantiestudie bestaat uit analyses voor de evaluatie van de prestatie van het bergingssysteem, gevolgd door een vergelijking van de resultaten van de analyse met veiligheidscriteria. Een performantiestudie bestaat uit twee stappen: een scenarioanalyse en een analyse van de gevolgen van de geïdentificeerde scenario's.

In de scenarioanalyse worden de voor het beschouwde bergingssysteem relevante scenario's geïdentificeerd. Eerst wordt een lange lijst van fenomenen, gebeurtenissen en processen (FGP's), die mogelijk het gedrag van het bergingssysteem kunnen beïnvloeden, opgesteld. De beschouwde FGP's kunnen veroorzaakt worden door natuurlijke fenomenen, door menselijke activiteiten en tenslotte door het afval en bergingsinstallatie zelf. Vervolgens wordt nagegaan welke FGP's relevant zijn voor de beschouwde berging.

In het geval van berging in klei wordt meestal het begrip normaal evolutiescenario ingevoerd.

In dit scenario worden alle FGP's, die bijna zeker zullen optreden, beschouwd.

De overblijvende FGP's kunnen nog gegroepeerd worden op basis van welke component van het bergingssysteem zij kunnen beïnvloeden. Tenslotte worden op basis van de gegroepeerde FGP's een aantal scenario's met gewijzigde evolutie gedefinieerd.

Voor de site van Mol werden naast het normaal evolutiescenario de volgende scenario's met gewijzigde evolutie geïdentificeerd: strenge ijsijd, optreden van een breuk, diepe boring voor waterwinning, exploratieboring, gebrekkige afdichting, vroegtijdig defect van geconstrueerde barrières en transport van radionucliden ten gevolge van gaseffecten.

Voor de analyse van de gevolgen van het normaal evolutiescenario wordt het begrip robuust concept ingevoerd. Dit betekent dat het bergingssysteem sterk vereenvoudigd wordt tot een beperkt aantal essentiële componenten en processen. Voor de simulatie van het transport van de radionucliden wordt het bergingssysteem ingedeeld in vier componenten: het nabije veld, de kleilaag, de watervoerende lagen en de biosfeer.

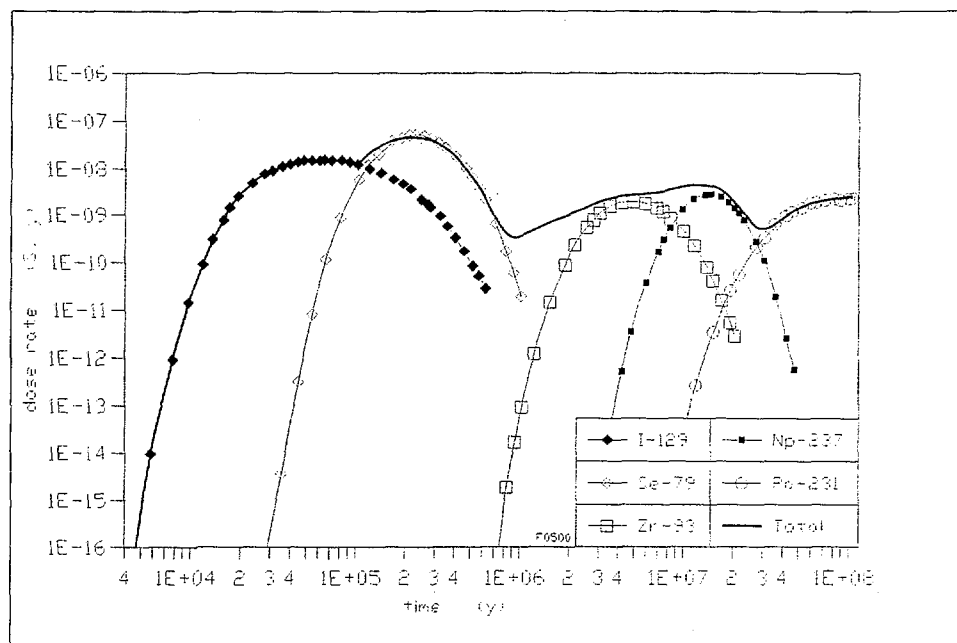
Twee soorten berekeningen worden uitgevoerd:

- deterministische "beste schatting" berekeningen, waarbij de berekening wordt uitgevoerd met de beste schatting van de parameterwaarden; hierbij kunnen vrij complexe modellen toegepast worden;
- stochastische berekeningen zijn gebaseerd op Monte Carlo simulaties waarbij het systeem meestal gesimuleerd wordt met behulp van vereenvoudigde modellen en waarbij de parameterwaarden getrokken worden uit hun waarschijnlijkheidsdichtheidsfuncties; deze functies beschrijven de onzekerheden in de parameterwaarden; met de resultaten van de stochastische berekeningen kunnen gevoeligheids- en onzekerheidsanalyses uitgevoerd worden.

Een voorbeeld van de berekende dosissen via een waterput in het geval van het normaal evolutiescenario voor de berging van hoog actief verglaasd afval wordt gegeven in *figuur 4*.

Figuur 4

Berekende dosis via een waterput voor de berging van hoog actief verglaasd afval. Normaal evolutiescenario.



Hierbij valt op dat slechts een klein aantal radionucliden de biosfeer bereiken en dit pas na meer dan 5000 jaar. Inderdaad de meeste radionucliden vervallen tot verwaarloosbare concentraties gedurende hun migratie doorheen de kleilaag. Alhoewel het voor de beschouwde tijden niet meer mogelijk is om betekenisvolle voorspellingen te maken, werden de dosissen doorberekend tot 100 miljoen jaar in de veronderstelling dat de eigenschappen van de klei, watervoerende lagen en biosfeer slechts in beperkte mate veranderen, om aan te tonen dat op zeer lange termijn geen ernstigere radiologische gevolgen moeten verwacht worden dan voor bv. de eerste 100.000 jaar.

De berekende maximale dosis bedraagt $3 \cdot 10^{-7}$ Sv/jaar. In België geldt voor nucleaire activiteiten een dosislimiet van 10^{-3} Sv/jaar voor leden van de bevolking. Omdat de dosissen in het geval van geologische berging over zeer lange tijdsperiodes zullen aanhouden en de toekomstige mens aldus kan blootgesteld worden aan straling afkomstig van verschillende oorsprong, beveelt de ICRP aan /26/ dat voor elke bron van mogelijke straling een dosisbeperking, die een fractie is van de dosislimiet, zou opgelegd worden.

De waarde van de dosisbeperking voor een geologische berging bedraagt in verschillende Europese landen 10^{-4} Sv/jaar.

De berekende maximale dosis, die nochtans geschat werd op basis van een aantal sterk conservatieve onderstellingen voor o.m. de positie van de waterput en het gebruik van het putwater, blijft nog altijd meer dan twee grootteordes lager dan de hiervoor vermelde dosisbeperking.

Uit de analyse van de gewijzigde evolutiescenario's blijkt dat de scenario's waarin de kleilaag niet in sterke mate wordt aangetast geen aanleiding geven tot aanzienlijk hogere dosissen dan die berekend voor het normaal evolutiescenario. Enkel in het geval van een exploratiescenario, dat veronderstelt dat kernen, die stukken verglaasd hoog actief afval bevatten, zullen opgehaald en onderzocht worden, worden aanzienlijke dosissen berekend voor een klein aantal betrokkenen. De waarschijnlijkheid van optreden van dit scenario is echter uiterst laag.

Naast de radiologische gevolgen kan een geologische berging ook chemo-toxische risico's inhouden wegens de aanwezigheid van een aantal toxische stoffen. Een evaluatie van deze laatste gevolgen /27/ heeft aangetoond dat de te verwachten contaminatie van het grondwater door zware en andere metalen verwaarloosbaar is.

5

Algemeen besluit



Het beheer van radioactief afval is voor vele landen een belangrijke technologische, economische en politieke uitdaging geworden, onafgezien van het belang van de electronucleaire productie in het land in kwestie. Dit beheer heeft dus vanzelfsprekend een grote invloed in elk energiedebat. Voor België gaat het om volumes die gaan van 10.000 m³ voor hoogactief afval en afval met lange halveringstijd, tot ongeveer 10 keer meer voor laagactief afval.

In vele landen bestaan er sinds verscheidene jaren reeds vormen van beleid of strategie. Wat de berging betreft, werden er aan de oppervlakte of op geringe diepte bergingsplaatsen aangelegd voor laagactief afval of voor afval met korte halveringstijd. Voor hoog- en middelactief afval is er op internationaal vlak een soort van consensus over de doeltreffendheid van een oplossing van het type van "geologische berging" op een diepte van enkele honderden meter, maar de onzekerheid hierover neemt toe naarmate de veiligheidsvereisten in de tijd vorderen. Zo moet er nog belangrijk onderzoek gebeuren naar de beste systemen voor conditionering van het afval, over de dynamica van het geologische milieu en voor het valideren van de prestatie van dit onderzoek en bijgevolg de zekerheid op lange termijn. Naast de technische en wetenschappelijke aspecten die aan de basis liggen van elke beslissing aangaande de haalbaarheid van het project, de keuze van gepaste sites en de veiligheid op lange termijn, zijn er nog talrijke andere aspecten waarmee rekening moet gehouden worden, zoals beperkingen op het gebied van het bergingsconcept en wettelijke, operationele of economische factoren.

Net zoals in België, hebben Duitsland, de Verenigde Staten en Frankrijk mogelijke sites gekarakteriseerd waar elk land een ondergronds laboratorium gebouwd heeft of overweegt er een te bouwen. Andere landen, zoals Canada, Zweden en Zwitserland, kozen voor laboratoria voor 'generisch' onderzoek waar studies worden uitgevoerd die niet specifiek zijn voor de site.

België blijft de referentie voor het onderzoek van berging in kleifformaties, zelfs al zijn de formaties van Frankrijk, Spanje of Zwitserland harder en minder plastisch. Dank zij de toegepaste benadering was het mogelijk stapsgewijs te vorderen volgens iteratieve veiligheidsevaluaties en volgens globale evaluaties die georganiseerd werden door de bevoegde overheid. De Belgische benadering, die al meer dan 25 jaar wordt toegepast, kan als volledig gevalideerd beschouwd worden op basis van gelijkaardige ontwikkelingen die sindsdien in verschillende contexten op internationaal vlak werden gevoerd.

Tot op heden hadden deze studies enkel betrekking op de Boomse klei onder de nucleaire site van Mol. De eigenschappen van deze formatie die a priori gunstig waren en haar geologische context werden mettertijd bevestigd voor de verschillende betrokken disciplines. In een eerste stadium werden de verschillende processen afzonderlijk benaderd en, nadat deze fenomenen voldoende gekend waren, werden de nodige verbanden onderzocht in het raam van het globale concept. De ondersteuning van grootschalige demonstratie- en validatieproeven vanuit het ondergrondse Hades-laboratorium, in omstandigheden die representatief zijn voor een werkelijke berging, is één van de sterke punten van het Belgische project. Mede daardoor kon de internationale samenwerking in het raam van onderzoeksprojecten met gedeelde kosten met de Europese Gemeenschap gevoelig worden opgedreven. Tegelijkertijd werd het lange-termijn gedrag van het borosilicaatglas, zoals het door Cogema gebruikt wordt als inbeddingsmatrix, en waarop het Hades-programma tot op dat ogenblik gericht was, op een even gedetailleerde wijze gekarakteriseerd waarbij bevestigd werd dat het past binnen het beoogde doel en verenigbaar is met het milieu van het Belgische concept.

Overeenkomstig de aanbevelingen van de beoordelingscommissie binnen het raam van het SAFIR I-rapport, wordt thans een andere geologische formatie onderzocht. De verkenningsboring in de Ieperse klei onder de site van Doel en de analyses op kernboringen die zullen uitgevoerd worden, zullen binnen enkele maanden toelaten te evalueren in welke mate deze formatie in aanmerking kan komen.

Uit performantie-evaluaties over de Boomse klei te Mol is gebleken dat zowel de radiologische als de toxische gevolgen van zulk hoogactief afval en/of afval met lange halveringstijd duidelijk onder de criteria blijven die toegepast worden voor de meerderheid van de beschouwde criteria. De geldigheid van de uitgevoerde evaluaties wordt bevestigd door de steeds talrijkere vergelijkingen van modellen, berekeningscodes en scenario's op internationaal vlak en door de voortdurend systematischer gevoeligheids- en onzekerheidsstudies.

Ten einde de geloofwaardigheid te vergroten ten opzichte van de beschouwde tijdsschalen, is men zich achtereenvolgens gaan interesseren voor de performantie-evaluaties:

aan de studie van de natuurlijke analogen en hun praktische toepassing op kandidaat-bergingssites;

aan paleo-hydro-geologische studies, namelijk de evolutie van het hydrogeologisch systeem op middellange termijn. In de praktijk moeten deze verschillende acties ons toelaten de evaluaties op 10.000 jaar nog betrouwbaarder te maken, waarbij de evaluaties kwalitatief blijven tussen 10.000 en 100.000 jaar en hierna indicatief zijn.

Tot besluit kan gesteld worden dat de voortzetting van het R&D-programma onvermijdelijk is, zowel voor de verschillende geconditioneerde afvalsoorten die tot op heden onderzocht werden, teneinde bepaalde werkhypotheses te bevestigen (inventaris, concept, scenario's, parameters, koppelingen, codes, ...) of om bepaalde voorafgaande studies te bevestigen (bijv. de niet-radiologische gevolgen) en deze uit te breiden tot ander afval of materiaal waarvoor een oplossing en/of een performantie-valuatie nog nodig zijn. Dit rapport toont onder meer dat de compatibiliteit van bepaalde afvalvormen met de omgeving en hun veroudering een aantal bijkomende acties vereisen. Het concept zal niet altijd kunnen aangepast worden aan het afval, en daarom zullen bepaalde conditioneringstechnieken moeten herzien worden of ontworpen worden in functie van het weerhouden concept.

Naast de berging van hoogactief afval en de alternatieven die voor laagactief afval worden bestudeerd, zijn bijkomende ontwikkelingen volgens dezelfde benadering nodig voor andere domeinen. Wij verwijzen hierbij naar studies over het concept, de karakterisering en de evaluaties met betrekking tot de rechtstreekse berging van opgebruikte splijtstof, naar de gelijkaardige studies voor de berging van middelactief afval volgens het concept dat in figuur 2b wordt voorgesteld. Dit laatste stelt problemen die beduidend anders op te lossen zijn zoals bijv. de gasproductie die gebonden is aan de aanwezige hoeveelheid staal, of nog de wijziging van de scheikundige eigenschappen van de klei in de nabije omgeving als gevolg van de aanwezigheid van een grote hoeveelheid opvulbeton.

Een gedetailleerde programmatie van de stappen die zullen leiden tot de geologische berging zal ook op korte en middellange termijn nodig zijn. Deze programmatie zal het geheel van de vereiste procedures moeten vastleggen voor het toekennen van licenties en voor het onvermijdelijke overleg op de verschillende beslissingsniveaus. Binnen deze context is het definiëren van de aanvaardbaarheidscriteria voor het ondergronds te bergen afval, rekening houdend met de problematiek die in dit document wordt voorgesteld, een bijkomend activiteitsgebied waarbinnen het SCK•CEN zijn kennis ten dienste zou kunnen stellen.



Referenties

- 1 B. Neerdael, L. Baetslj, G. Collard, P. Dejonghe, C. De Raedt, J. Marivoet, Projets CAPRA et SPIN, SCK•CEN, Report BLG-676, 1995
- 2 H. Nifenecker, A. Giorni, J.M Loiseaux, "Quand les déchets deviennent combustibles" La Recherche, n° 301, septembre 1997, 75-78.
- 3 P.Van Iseghem, R.Carchon, P.De Regge, "SCK•CEN as a waste characterization laboratory". To be published in RADWAP '97, Proceedings to be published by KFA Jülich.
- 4 P.Van Iseghem, G.Brunel, C.Lierse, A.Morales, R.Odoj, F.Troiani, M.Hugon, "The European Network for quality checking of waste packages: objectives and status". Management and Disposal of Radioactive Waste, EUR 17543 (1997), 286- 295.
- 5 P.Van Iseghem, M.Aertsens, K.Lemmens, P.Lolivier, V.Pirlet, E.Valcke, Wei Jiang, "Long-term performance of high-level waste forms under clay repository conditions". Final Report for 1991-1996 to the IAEA. To be published.
- 6 P.Van Iseghem, Wei Jiang, M.Blanchaert, K.Hart, A.Lodding, "The interaction between Synroc-C and pure water or Boom clay". MRS Symposium Proc. Vol 412, 1996, 305-312.
- 7 A.Sneyers and P.Van Iseghem, "The leaching behaviour of bituminized radioactive waste in the geological disposal conditions of the Boom clay formation", To be published in Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI, MRS Symposium Proceedings series.
- 8 B.Kursten, B.Cornélis, S.Labat, P.Van Iseghem, "Completion of the corrosion programme in Boom clay- in situ experiments". Final Report 1991-1994. EUR 17105 (1997)
- 9 Vergelijking van de verschillende opties voor het beheer op lange termijn van laagactief en kortlevend afval. Aspecten veiligheid en kostprijsverschillen. NIROND 97-04, 1997
- 10 Communication L. froment (Ondraf/Niras), 1997
- 11 Communication J. Marivoet (CEN•SCK), 1997
- 12 The principles of radioactive waste management, Safety Series 111-F, IAEA, Vienna, 1995
- 13 De oppervlakteberging op Belgisch grondgebied, van laagactief afval en afval met korte halveringstijd: Synthese en aanbevelingen, NIRAS/ONDRAF, rapport NIROND 94-04, 1994
- 14 N. Cadelli, G. Cottone, S. Orlowski, G. Bertozzi, F. Girardi, A. Saltelli PAGIS, Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste, Summary, EC, Luxemburg, report EUR 11775 EN, 1988
- 15 J. Marivoet, T. Zeevaert and A. Bonne PACOMA : Performance assessment of the geological disposal of medium- level and alpha waste in a clay formation in Belgium, EC, Lux., report EUR 13042 EN, 1991
- 16 J. Marivoet UPDATING 1990 : Updating of the performance assessments of the geological disposal of high-level and medium-level wastes in the Boom clay formation SCK•CEN, report BLG 634, 1992
- 17 SAFIR I, Safety Assessment and Feasibility Interim Report, NIRAS/ONDRAF, 1988
- 18 J. Marivoet, G. Volckaert, A. Snyers, J. Wibi First performance assessment of the disposal of spent fuel in a clay layer, EC, Luxembourg, report EUR 16752 EN, 1996
- 19 Evaluatiecommissie SAFIR I, Eindverslag, Staatssecretariaat voor Energie, 1990
- 20 Senaatcommissie voor informatie en onderzoek inzake nucleaire veiligheid, Eindverslag en aanbevelingen, 1991
- 21 Catalogue Européen des formation géologiques présentant des caractéristiques favorables à l'évacuation des déchets radioactifs solidifiés de haute activité et/ou de longue vie, Vol. 2 Belgique, EC, Luxembourg, 1979
- 22 L. D'hooghe, P. Laga, C. Vandormael Opsporen van geschikte sites voor de diepe berging van radioactieve afval B en C in de streek van Mol-Dessel, NIRAS/ONDRAF, rapport BGE DS 90/04, 1991
- 23 Management and Disposal of Radioactive Waste, EC, Luxembourg, report EUR 17543, pp. 473-485, 1997
- 24 J.M. Gomit, J. Marivoet, P. Raimbault, F. Recreo

- EVEREST: Evaluation of Elements Responsible for the effective Engaged dose rates associated with the final Storage of radioactive waste, Vol. 1: Common aspects of the study, EC, Luxembourg, report EUR 17449/1 EN, 1997
- 25 J. Marivoet, G. Volckaert, I. Wemaere, J. Wibin
EVEREST, Vol. 2a: Clay formation, site in Belgium, EC, Luxembourg, report EUR 17449/2a EN, 1997
- 26 Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste, ICRP Publication 46, Annals of the ICRP, 15(4), 1985
- 27 P. Harju-Autti, G. Volckaert, Evaluation of the chemical-toxic consequences of geological disposal of radioactive waste, SCK•CEN, report R-3051, 1995